人工衛星構造材料の電子線照射に伴う帯電特性

正員 小松原 実 (岡山商大) 正員 石井 勝 (東京大)

Charging Characteristics of Construction Materials of Spacecraft Irradiated by Electron Beam

Minoru Komatsubara, Member (Okayama Shouka University), Masaru Ishii, Member (The University of Tokyo)

Composite materials like carbon fiber reinforced plastics (CFRP) or fiber reinforced plastics (FRP) are used for construction materials of spacecraft. In case fiber reinforced plastics (FRP) are used for construction materials of spacecraft, germanium (Ge) sputtered FRP is used because of its ability of thermal control. On an orbit of high altitude, the charging on polymer materials can cause troubles in measurements on spacecraft.

To investigate the charging phenomena on these kinds of materials in vacuum, electron beams are irradiated on test pieces of FRP, Ge-sputtered FRP and CFRP. The experiments are conducted in a high-vacuum chamber attached with an electron beam gun.

The results show that the absolute values of the surface potential of Ge-sputtered FRP keep lower values than that of FRP. The irradiation on negatively charged Ge-sputtered FRP decreases the magnitude of the surface potential. Ge-sputtered FRP with a thicker layer of Ge shows a similar and pronounced tendency. Irradiation with higher current density also causes more rapid decrease of the potential. The results for CFRP also show low values of the saturated surface potential. These characteristics are different from those of simple polymer test pieces such as a fluoroethylenepropylene (FEP) film. In spite that the penetration depth of electrons is confined in Ge layer, the surface potential of Ge-sputtered FRP shows lower values than the potential expected for single materials. The mechanism of this phenomenon seems to be related to secondary electron emission.

キーワード: FRP, 帯電, 蒸着, 真空, 2次電子

1. はじめに

人工衛星の構造材料には、軽量であることと高強度であることが同時に要求される。このような用途に、エポキシ樹脂に炭素繊維を加えて材料の強度を上げた CFRP や、ガラス繊維を加えた FRP が用いられる場合がある。電子線等の荷電粒子の照射を受ける宇宙環境においては、このような人工衛星の外側に使用される材料の帯電現象⁽¹⁾は、人工衛星の信頼性に強い影響を及ぼしうる。人工衛星から張り出して設置されるアンテナなどの支持構造物として用いられる FRP 等が帯電すると、計測などの機能に障害が発生する恐れがあるが、電磁波を透過させる必要性から、金属材料をこの用途に用いることができない場合もある。

このような材料の表面は、太陽光線を受けた場合と日陰になった場合とで、その温度差が大きくなり人工衛星内部の装置に影響を与えることがある。そのような大きな温度差の発生を防ぐために熱制御を行う必要があり、FRP の表面に電磁波の透過の障害にならない程度の厚さでゲルマニウム(Ge)蒸着膜を形成する方法が用いられる。しかし、CFRP や FRP のような複合材料や、それらに金属蒸着膜を形

成したものに対して、電子線が照射された場合の帯電現象に関する報告は、ほとんどないのが現状である。

これまで、筆者らは FEP などの高分子フィルムが電子線照射を受けた場合の帯電現象に関して、その特性に関する実験結果および機構に関する検討結果を報告してきたが⁽²⁾、本研究では、半導体と高分子の複合構造材料である CFRP、FRP、Ge 蒸着 FRP、Al 蒸着 FEP の各試料に対して真空容器中において電子線照射を行い、その測定結果に基づき、単一の高分子材料と比較した場合の各試料の帯電特性とその機構に関して検討を行った。

2. 実験装置および方法

CFRP 試料には、厚さ約 0.5mm、大きさ 5cm x 5cm のものを用いた。試料表面は起伏が激しく、抵抗率の測定が困難であるため行っていないが、後述の帯電後の電位の緩和速度の測定結果から、本研究での議論の対象である到達電位の値には導電電流の影響はほとんどないものと判断される。

FRP 試料には、厚さ 1mm、大きさ 5cm x 5cm の FRP 板に、

厚さ 10nm および 50nm で Ge 蒸着を行ったもの、および蒸着を行っていないものの 3 種類を使用した。Ge 蒸着 FRP は蒸着後に試料端部を切断してあり、Ge は端部には蒸着していないので、端部を通じて漏れる電流はきわめて小さい。これは表面電位の緩和(後述)がきわめて遅いことから確認されている。また、CFRP と同様に到達電位への導電電流の影響はほとんどないものと考えられる。

試料は、真空容器中で電子線照射を行い、一定時間毎に照射を停止してその表面電位を非接触で測定する。このために用いた真空容器は、直径 40cm、高さ 47cm のステンレス鋼製容器で、上部に設置された電子銃には負電圧がかけられ、これにより接地されたアルミニウム製試料台に対して加速された電子線が照射される。真空容器の概略を図1に示す。

試料の表面電位は、非接触の表面電位計(Trek 社製 Model341 型、測定可能範囲 $\pm 20\text{kV}$)のプロブを試料表面上方約 2mm の高さで、試料中央部付近に移動させて測定した。この測定方法においては、接地電位にある試料台の影響は無視しうるものである⁽²⁾。

図1 真空装置概略
Fig. 1. Vacuum chamber.

3. 実験結果および考察

<3.1> Ge10nm 蒸着 FRP の結果 蒸着なしの試料に対して電子線照射をおこなった場合の表面電位は、電流密度 $2\text{nA}/\text{cm}^2$ において、照射エネルギー1~5keV で図2のようになった。

照射エネルギーが 1.5keV 以上では、表面電位はほぼ照射エネルギーと同じ割合で増加している。また、照射 30 秒の時点でほぼ電位の絶対値の上昇は飽和していることがわかる。また、照射エネルギーと表面電位の差は、1.3~1.4kV となっている。一方、人工衛星表面材料として使われる fluoroethylenepropylene(FEP)や polyethyleneterephthalate (PET) ではこの値は約 2kV である⁽²⁾。FEP や PET のような高分子材料の場合、127 μm 程度以上の厚さの場合には、内部を

図2 FRP 試料の表面電位の照射電子線エネルギー依存性

Fig. 2. Surface potential of FRP dependent on irradiation energy.

流れる導電電流が到達電位の値に及ぼす影響はほとんどない⁽²⁾。したがって、FEP や PET に比較すると、今回使用した FRP は FEP や PET よりも照射された電子線のエネルギーの値に近い電位まで帯電しやすい試料であることになる。

これに対して、Ge10nm 蒸着 FRP の場合の、電流密度 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ での電子線照射 60 秒後の表面電位の測定結果を図3に示す。

図3. Ge10nm 蒸着 FRP の表面電位の照射電子線エネルギー依存性

Fig. 3. Surface potential of FRP sputtered with Ge of 10 nm thick dependent on irradiation energy.

Ge 蒸着 FRP の場合には、電子線照射エネルギーが 2.4keV までは、表面電位はほぼ 0V のままであることがわかる。Ge 蒸着なしの FRP の場合と比べて、電子線照射エネルギーが約 1keV 高くなるまでは、表面の帯電が発生しないことになる。なお、Ge 蒸着 FRP に 3.5keV、 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ で 60 秒間の電子線照射を行ない、-1015V の帯電を生じさせた後、電子線照射を停止して、電位の変化を測定した結果、3 分経過時

で -999V 、5分経過時で -990V であり、電位の緩和速度は小さいことがわかる。

次に、試料表面が -1kV に帯電した状態で、 2keV 、 $0.1\text{nA}/\text{cm}^2$ および、 $0.3\text{nA}/\text{cm}^2$ の電子線照射をおこなった場合の表面電位の時間変化を図4に示す。

図4 2keVの電子線照射時のGe10nm蒸着FRPの表面電位の時間変化

Fig. 4. Time variation of surface potential of FRP sputtered with Ge of 10 nm thick irradiated by electron beam of 2keV.

$0.1\text{nA}/\text{cm}^2$ の場合で6分前後、 $0.3\text{nA}/\text{cm}^2$ の場合では2分以内に、表面の帯電はほぼなくなっており、電流密度が大きいほど急速に帯電が緩和されている。これは、2次電子として試料表面から電子が放出され、表面電位を緩和しているものと考えられる。

さらに、表面電位を -1kV に帯電させたGe10nm蒸着FRP試料に対して、電流密度 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ において何通りかのエネルギーの電子線照射を1分間おこなった場合の、残留表面電位を測定した結果を図5に示す。

図5 照射エネルギーと帯電させたGe10nm蒸着FRPの残留表面電位の関係

Fig. 5. Relationship between irradiation energy and residual potential of pre-charged FRP sputtered with Ge of 10 nm Thick.

照射エネルギーが 2.4keV 付近までは、表面電位はほぼ 0V に緩和されている。 2.5keV 以上では表面電位は 0V までは緩和されず、照射エネルギーの値が増加するに伴い、表面電位の絶対値も上昇している。

一般に、高分子材料表面に電子線照射をおこなった場合には、2次電子放出が関係するために、表面電位の飽和時の値は照射エネルギーに対して、絶対値で 2kV 程度低い電位となる。このときの表面電位と照射エネルギーの差は、2次電子と後方散乱電子の総量の入射電子に対する収量(yield)が1になる時の電子線エネルギーと関係し、2次電子放出特性から計算により求めた表面電位と測定値は比較的良好に一致する⁽²⁾。

yieldと照射エネルギーの関係を表す曲線の最大値となる部分を1として、Geの実験データをもとに描かれた規格化2次電子放出比曲線⁽⁴⁾を用いて、今回使用したGeの場合にyieldが1となるときの照射エネルギーを求めてみる。yieldが最大値をとるときの照射エネルギー E_m は $300\sim 500\text{eV}$ 、その時のyieldの最大値は $1.1\sim 1.3$ であり⁽³⁾、これより、 E_m を 400eV 、その場合のyieldの値を 1.1 と仮定する。規格化2次電子放出比曲線の最大値の値を 700eV 、そのときのyieldを 1.1 として曲線を描き直し、yieldが1になる時のエネルギーをこの曲線から求めると約 700eV となる。(図6)

図6 照射エネルギーに対するGeのyieldの変化(概形)

Fig. 6. Relationship between irradiation energy and yield of Ge.

この 700eV という値が照射エネルギーと表面電位の差になるものとした場合に予測される表面電位と比較して、測定された表面電位は、実験で使ったどの照射エネルギーにおいても絶対値で低い値となっている。

さらに、表面電位の値に対して、どの程度のエネルギーの電子線照射が行われれば帯電を緩和することができるのかを調べるために、 5keV 程度までの電子線を照射し、あらかじめ -470V から -2580V までの電位に帯電させた試料に電流密度 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ の電子線を照射し、照射エネルギーを 100eV から上昇させていった場合に、電位の緩和が始まった時点の照射エネルギーを測定した結果を図7に示す。

図7 Ge10nm 蒸着 FRP の表面電位緩和開始時の電子線エネルギーと表面電位の関係

Fig. 7. Relationship between energy of electron beam at beginning of relaxation of surface potential of FRP with Ge of 10 nm thick.

この結果から、 -2.5kV 程度までの帯電をした Ge10nm 蒸着 FRP 試料に対して、どの程度のエネルギーの電子線を照射すれば、電位の緩和ができるかの目安を得ることができる。ただし、緩和開始時の照射エネルギーを測定した後、さらに照射を継続した場合、 2.3keV 以上のエネルギーで緩和が始まる場合には、照射を続けても電位は 0V までは緩和されなかった。

<3.2> Ge50nm 蒸着 FRP の結果 このような試料の差異による帯電特性への影響を検討するために、Ge 蒸着膜厚 50nm の試料を用いて同様の実験を行った。電子線照射電流密度 $1\text{nA}/\text{cm}^2$ で 1 分間照射を行った場合の表面電位を図8に示す。

図8 照射エネルギーと Ge50nm 蒸着 FRP の表面電位の関係

Fig. 8. Relationship between irradiation energy and surface potential of FRP with Ge of 50 nm thick.

照射エネルギーが 2.4keV までは、表面電位がわずかに正か、ほぼ零電位になっており、さらにエネルギーが上昇するにつれて表面電位の絶対値も徐々に上昇しているが、照射エネルギーの上昇分に比べると、かなり小さな値となっている。そしてこれらの 3keV 以上の照射エネルギーでの表面電位は Ge10nm の場合よりもかなり低い値となっている。これは、Ge 蒸着膜の存在が、表面電位の上昇を抑制する効果があることを示している。

また、表面を約 -1kV に帯電させた試料に対して、 2keV 、 $0.1\text{nA}/\text{cm}^2$ の電子線照射を行った場合の表面電位の時間変化を測定した結果を図9に示す。帯電の除去効果も、Ge10nm 蒸着 FRP と比較して短時間で現れており、帯電電圧の抑制および帯電の緩和効果に関しては Ge 蒸着膜厚依存性があることが示された。

図9 帯電させた Ge50nm 蒸着 FRP に電子線を照射したときの表面電位の時間変化

Fig. 9. Time variation of surface potential of pre-charged FRP with Ge of 50 nm thick irradiated by electron beam.

<3.3> CFRP の結果 CFRP 試料に対して、照射エネルギーを 5 および 10keV とし、電流密度を $1\text{nA}/\text{cm}^2$ とした場合の試料表面電位の時間変化を、図10に示す。両者を比較すると、照射エネルギーに 5keV の差があっても、到達表面電位の値は、数百 V しか差がなく、また、到達電位の値自体が絶対値で $700\text{V} \sim 1200\text{V}$ 程度の低いものとなっている。FEP や PET の場合には、照射エネルギーと表面電位との差は、約 2kV 程度の値⁽²⁾であったことと比較すると、CFRP の帯電特性は、単一の高分子材料とは大きく異なっている。

一般に試料の導電率が大きな試料の場合には、試料中を表面から背面の接地された電極へと流れる導電電流が大きいために、電子線照射停止後の表面電位の緩和速度が早い。しかし、電子線照射停止後の電位の変化を測定した図11では、表面電位の緩和速度は、FRP と比較して CFRP 試料は特に早いとはいえない。したがって、CFRP が低い表面電位となる原因は、導電電流によるものではないものと判断される。これらの結果から、CFRP は炭素繊維が含まれる高分子

図10 CFRP 試料の表面電位の時間変化

Fig. 10. Time variation of surface potential of CFRP irradiated by electron beam of 5 and 10 keV.

図11 CFRP 試料の表面電位の緩和

Fig. 11. Relaxation of surface potential of CFRP.

複合材料であるが、本研究で用いたものについてはバルクとしての導電率は大きくはなく、したがって表面電位の値の決定においては別の要因が支配的であることになる。さらに、CFRP 試料では FEP などの単一の高分子材料と比較して、電子線照射を受けた場合に表面電位の絶対値が小さい値を保つ特性を持っていることが示された。

<3.4> 帯電機構の検討 電子が物質に照射された場合の入射電子のエネルギーが零となる物質層の厚さ（実用飛程）の近似式を、Katz と Penfold は照射される電子のエネルギーが低い範囲(<3MeV)で(1)式のように示している⁽⁴⁾。

$$R\rho = 412E^n \text{ [mg/cm}^2\text{]} \dots\dots\dots (1)$$

$$n = 1.265 - 0.0954 \log E$$

(R:飛程[cm], ρ :物質の密度[mg/cm³], E:電子のエネルギー[MeV])

これにより、Ge、シリコン、アルミニウムおよび比重が 0.9 程度であるエポキシ樹脂について、電子の飛程を求めると、図12のようになる。

図12 電子のエネルギーと飛程の関係

Fig. 12. Relationship between electron energy and depth of electron penetration.

これより Ge 蒸着 FRP の場合は、Ge 蒸着層の厚さが 10nm のとき約 2.4keV、50nm のとき約 4.5keV の照射エネルギーまでは、電子線は FRP 層には届かず、Ge 蒸着層にとどまることになる。

Ge 単体に電子線を照射した場合には、照射開始直後の表面電位が上昇していない時には、試料表面における電子線のエネルギーは、接地電位に対するものと同じとなるが、試料表面電位が上昇してくるにつれ、試料に対して電子の持つエネルギーは減少し、図6における yield が 1 を越える時の照射エネルギー約 700eV になった時点で試料への電子線の入射はなくなり、電位上昇もその時点で停止することになる。したがって、Ge 単体の場合、接地電位へ流れる導電電流が十分に小さい場合には表面電位は電子線照射エネルギーから約 700V を引いた値となるはずである。FEP や PET などの高分子材料単体を用いた場合でも、yield が 1 を越える時の照射エネルギーと電子線エネルギーとの差が表面電位になるという測定結果が報告されている。これに対して、Ge 蒸着 FRP は飛程の計算結果では電子は Ge 層内にとどまるにもかかわらず、Ge 単体の場合に予想される表面電位よりも絶対値で低い表面電位を示すという測定結果が得られている。このような現象の機構には、今回用いた試料が導電性を持つ薄い蒸着膜と、その下の絶縁材料基板との複合材料であることが関係している可能性が考えられよう。

このような電子線照射による帯電特性が、Ge 蒸着膜と FRP の組み合わせに特有のものであるのかを検討するために、文献(2)で帯電特性の測定、検討が行なわれている厚さ 127 μ m の FEP フィルムにアルミニウム蒸着を行った試料に対して 10keV、1nA/cm² で電子線照射を行ない、5 および 10 分後の表面電位を測定したところ、表1のような結果が得られ、アルミニウム蒸着 FEP は蒸着を行なわない FEP に比べて、表面電位が非常に小さな値となった。

Ge の導電率は、 2.1S m^{-1} であるが、このような半導体と、Al のような金属とを比較して、同様の傾向が得られたこと

表1 FEP への電子線照射による表面電位の変化

Table 1. Relationship between irradiation time and surface potential of FEP.

	5 分	10 分
アルミニウム蒸着	-702	-718
蒸着なし	-7981	-8020

単位: V

から、10keV, 1nA/cm² の照射条件では電子線照射による帯電特性に関して、Ge 蒸着膜は Al 蒸着膜と同様の機構が働いており、半導体や金属の蒸着膜と高分子材料の複合構造がこのような特性をもたらしているものと考えられる。

また、金属蒸着膜のない CFRP においても、低い表面電位を維持する類似の特性があることから、炭素繊維と高分子材料の複合材料についても同様の機構が働いている可能性がある。いずれの試料の場合でも導電電流は小さいことから、2 次電子放出がこのような帯電特性に関連していると考えることが可能である。

本研究でとりあげた試料について、5keV, 1nA/cm² で 10 分間電子線照射を行なった場合の帯電電位測定結果をまとめて表2に示す。

表2 5keV, 1nA/cm² で 5 分間照射後の表面電位の比較

Table 2. Comparison of surface potential of various samples irradiated by electron beam of 5keV, 1nA/cm² for 5 min.

試料	表面電位 (kV)
FRP	-3.4
FEP	-3.6
Al 板(厚さ 1mm)*	-2.6
CFRP	-0.5
Ge10nm 蒸着 FRP	-2.4
Ge50nm 蒸着 FRP	-1.2
Al 蒸着 FEP	-0.5

(*Al 板は、ガラス板上に設置し、絶縁した状態で実験)

4. おわりに

人工衛星の構造材としての FRP に対する宇宙環境下での帯電を検討するために、真空容器を用いた電子線照射実験を行い、Ge 蒸着 FRP に関する帯電特性を測定した。それにより、Ge 蒸着を行った場合には、FRP のみの場合に比較して表面電位の絶対値が低くなり、帯電しにくくなることが明らかになった。

また、-1kV に帯電した状態の Ge 蒸着 FRP に対して、2keV 程度の電子線照射を行うと、急速に帯電が緩和されることがわかった。蒸着膜厚と帯電特性および、帯電の緩和

特性には関連があり、蒸着膜厚が 10 および 50nm の場合では、厚いほうがより顕著な帯電の緩和効果が観察された。電子線の飛程の計算結果から、2keV 程度のエネルギーで試料に照射された電子は、本研究で用いた厚さの Ge 蒸着膜厚の条件では、Ge 膜内にとどまり、FRP 層には達しないにもかかわらず、実験による帯電特性測定結果は、Ge 単体の材料で予想される帯電特性とは異なるものとなっている。このような帯電特性は、Ge 蒸着 FRP のみならず、アルミニウム蒸着 FEP フィルムにも見られた。また、炭素繊維と高分子材料の複合材料である CFRP においても、表面電位が低く抑えられるという結果が得られており、今後、電子線照射による帯電特性に関して、金属蒸着膜を持つ材料や炭素繊維を含む材料における 2 次電子放出等の影響を検討する必要があるものと考えられる。

謝辞

実験装置の製作ならびに CFRP 試料の帯電特性に関する実験に携わっていただいた元大学院生の大谷淳一氏、試料の入手に便宜をおはかりいただいた(株)日本電気の安藤昌紀氏に深謝いたします。

(平成 9 年 1 月 13 日受付, 平成 9 年 8 月 18 日再受付)

文献

- (1) M. S. Gussenhoven and E. G. Mullen : "Geosynchronous Environment for Severe Spacecraft Charging", J. Spacecraft and Rockets, Vol. 20, p.26 (1983)
- (2) 小松原, 石井, 津村, 北條 : 「電子線照射された人工衛星表面材料上での帯電と放電のパラメータ」, 電学論 A, Vol.116-A, p.592 (1996)
- (3) 応用物理学会編, 「応用物理データブック」, 丸善 (1994)
- (4) 日本学術振興会第 132 委員会編, 「電子・イオンビームハンドブック」, 日刊工業新聞社 (1973)

小松原 実

(正員) 1959 年 6 月 15 日生。1984 年 3 月京都大学大学院工学系研究科修士課程修了。東京大学生産技術研究所勤務等を経て、1991 年 4 月岡山商科大学講師、1994 年 4 月同助教授、現在に至る。高電圧工学、情報処理に関する研究に従事。平成 3 年度電気学会論文発表賞受賞。

石井 勝

(正員) 1949 年 3 月 11 日生。1976 年 3 月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年 4 月東京大学助教授, 1992 年 7 月同教授, 現在に至る。工学博士。主として, 自然雷, 系統絶縁, 高電圧現象の測定に関する研究に従事。1988 年度日本大気電気学会学術研究賞受賞。平成元, 2 年度東京支部評議員。IEEE Senior Member。AGU, CIGRE, 日本大気電気学会等会員。